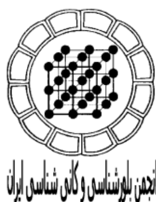
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی و دوم، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۳، از صفحهٔ ۸۳ تا ۹۸



کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، ساخت، بافت و چگونگی رخداد مس رسوبی آرک سرخ لایه، شمال غرب بیرجند، خراسان جنوبی

آرزو خسروی[1]، آزاده ملکزاده شفارودی[2*]، امیر مهدوی[3]

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی و گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- گروه زمین‌شناسی دانشکده علوم دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۳/۱۷، نسخه نهایی: ۱۴۰۲/۶/۱۲)

چکیده: رخداد معدنی مس‌آرک در ۵۵ کیلومتری شمال‌غربی شهر بیرجند در استان خراسان‌جنوبی واقع است. واحدهای سنگی دربرگیرنده این رخداد شامل ماسه‌سنگ‌های فلیش‌گونه نازک تا متوسط‌لایه به رنگ‌های قرمز و خاکستری به سن ائوسن هستند. کانی‌زایی مس در بخش بالایی ماسه‌سنگ‌های خاکستری پهنه شسته شده و بصورت عدسی شکل رخ داده است. دست کم دو افق کانه زایی شناسایی شد؛ هر یک از افق‌ها از سه پهنه قرمز اکسایشی، پهنه شسته‌شده و پهنه احیایی کانه‌زایی شده تشکیل شده‌اند که در رخداد مس‌آرک، بخش های کانه‌دار درون بخش شسته شده افق‌های احیایی وجود دارد. بافت ماده معدنی در این کانسار جانشینی و دانه پراکنده است. وجود پیریت‌های فرامبوئیدی در افق‌های کانه‌دار و نیز سالم ماندن ساختارهای سلولی جانشین شده با سولفیدها نشان می‌دهند که این کانسار در مراحل اولیه درونزایی و پیش از تدفین عمقی تشکیل شده است.کانه‌زایی در منطقه آرک از دید سنگ‌شناسی (سنگ میزبان ماسه‌سنگی گری‌وک تا لیت‌ارنایت)، کانی‌شناسی ماده معدنی (کالکوسیت، کوولیت)، ساخت و بافت، چینه شناسی و عامل‌های کنترل کننده کانه‌زایی (وجود آثار و بقایای گیاهی به عنوان عامل اصلی احیاکننده محیط، نفوذپذیری مناسب سنگ میزبان) مانند کانسارهای مس رسوبی نوع لایه های سرخ است.

واژه‌های کلیدی: *کانی‌شناسی؛ ساخت و بافت؛ افق‌های احیایی؛ بیرجند؛ مس رسوبی.*

مقدمه

کانسارهای مس چینه‌کران با میزبان رسوبی (Sediment-hosted stratabound copper deposits) یا کانسارهای نوع SSC دومین تولید کننده مهم مس پس از کانسارهای پورفیری به شمار می‌روند [۱]. حدود ۲۳ درصد از مس دنیا از این نوع کانسارها به دست می‌آید [۲-۴]. از دیگر دلایل اهمیت اقتصادی به‌سزا این کانسارها می‌توان به این موارد اشاره نمود که آنها مهمترین منبع کبالت در دنیا بوده و از مهمترین منابع نقره به عنوان برآورده فرعی هستند؛ همچنین آنها گاهی ذخایر ارزشمندی از اورانیوم رسوبی به همراه دارند [۱]. این کانسارها از دید شکل کانی‌سازی، عدسی مانند تا چینه‌سان هستند و طول آن‌ها دست کم چند برابر ستبرای آنهاست.

نهشته‌های متعددی از نوع SSC در ایران وجود دارد [۵] که بیشتر در پنج پهنه ساختاری قطعه طبس، پهنه زاگرس، پهنه ایران مرکزی، پهنه سبزوار و پهنه کپه‌داغ گسترش دارند (شکل۱) [۶].

این کانسارها در زمان‌های مختلف از جمله کامبرین-اردویسین (نهشته‌های ده‌معدن و خونگاه در پهنه زاگرس)، پرمین (کانسار قره‌تپه در پهنه ایران مرکزی)، ژوراسیک پسین (کانی‌سازی مس درسازند گره‌دو در راور-طبس-عشق آباد)، ژوراسیک پسین تا کرتاسه پیشین (کانی‌سازی در سازند شوریجه از پهنه کپه‌داغ)، ۵) الیگوسن تا میوسن (کانسار

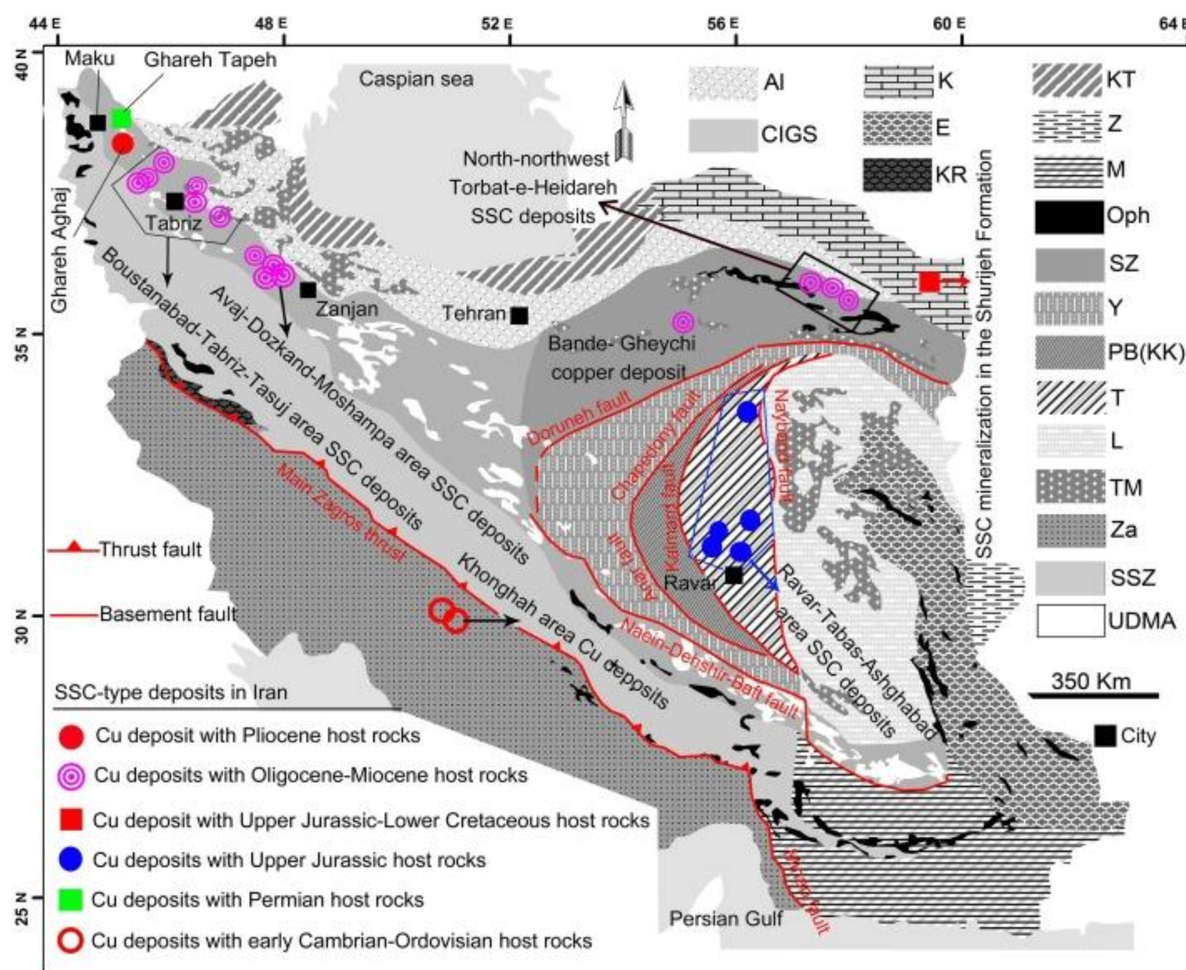
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۵۱۱۹۲۱۳۱، ست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]

بنده-قیچی، ناحیه بوستان آباد-تبریز-تسوج و منطقه آوج دوزکند-مشمپا) و سرانجام پلیوسن (کانسار قره آغاج در پهنه ایران مرکزی) شکل گرفته‌اند [۶].

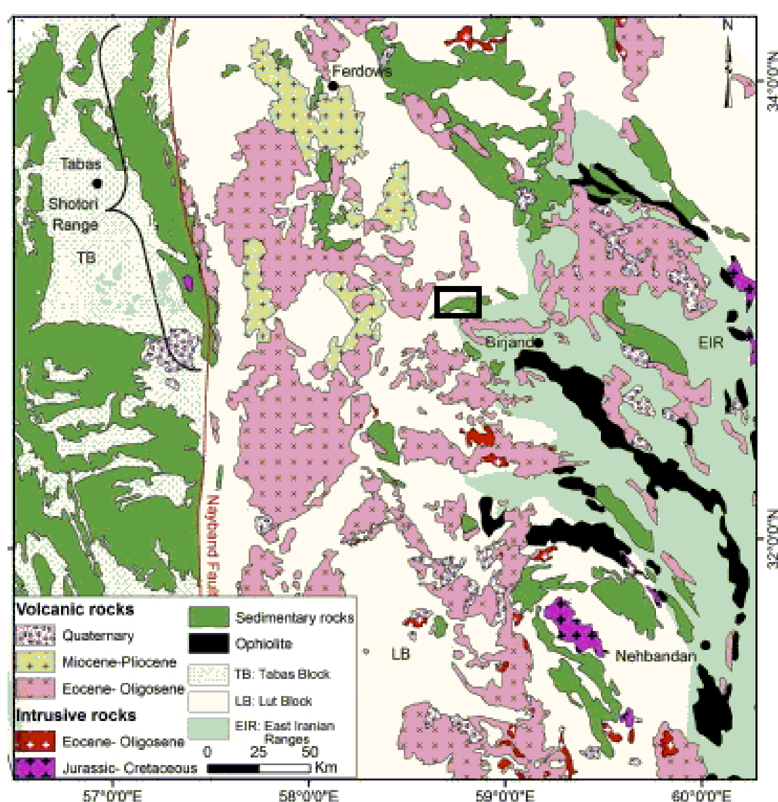
بر اساس تقسیم‌بندی‌های انجام شده، کانسارهای نوع SSC به سه دسته تقسیم می‌شوند [۱، ۷، ۸]: ۱- کانسارهای نوع رخساره احیایی reduced-facies، ۲- کانسارهای نوع ماسه‌سنگی Revett ۳- کانسارهای نوع سرخ لایه سرخ لایه که سنگ میزبان در این ذخایر توالی ضخیمی از ماسه‌سنگ، کنگلومرا و لای‌سنگ است. کانسارهای مس رسوبی نوع سرخ لایه کوچک، دارای تناژ پایین و محدود به افق‌های احیایی چند متری هستند.

منطقه مس آرک در نزدیکی کرانه شمال‌شرقی قطعه لوت واقع است (شکل ۲). رخداد معدنی مس آرک در مختصات جغرافیایی، در "58º37'30 تا "58º44'00 طول شرقی و تا "33º05'00 "35º01'30 عرض شمالی در ۵۵ کیلومتری شمال‌غرب بیرجند قرار دارد. بیشتر بررسی‌های انجام شده در این منطقه روی ویژگی‌های رسوب‌شناسی، واحد های سنگی و زمین‌ساختی است و تاکنون پیرامون کانه‌زایی مس پژوهشی صورت نگرفته است. در این پژوهش، افزون بر شناسایی و بررسی گسترش کانه‌زایی مس در شمال غرب بیرجند، ویژگی‌های کانی‌شناسی، ساختی-بافتی و همچنین چگونگی رخداد، و نوع آن در مقایسه با انواع جهانی ذخایر مس در سنگ‌های میزبان رسوبی، مشخص شده است.



شکل ۱ نقشه پراکندگی نهشته‌های نوع SSC بر اساس سن سنگ‌های میزبان در حوزه‌های زمین‌ساختی اصلی ایران برگرفته از مراجع [۶] (CIGS: منطقه تدریجی ایران مرکزی؛ E: محدوده شرق ایران؛ K: پهنه کپه داغ؛ KR: زیر پهنه رادیولاریت کرمانشاه؛ KT: پهنه ساختاری خزر_تالش‌زیوه ؛ L: قطعه لوت؛ M: پهنه مکران؛ O: کمربند افیولیتی؛ PB: قطعه پشت بادام؛ SSZ: پهنه سنندج _ سیرجان؛ T: قطعه‌طبس؛ TM: سنگ‌های ماگمایی ترشیری؛ UD: کمان ماگمایی ارومیه_دختر؛ Y: قطعه یزد؛ Z: منطقه زابل؛ Za، پهنه زاگرس).

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]



شکل۲ تصویری از زبانه‌های پایانی پهنه سیستان که وارد قطعه لوت شده‌اند و موقعیت منطقه مورد بررسی درآن [۴].

روش بررسی

برای بررسی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین شیمی، تعداد ۷۰ نمونه از منطقه برداشت گردید. از این بین، ۱۵ مقطع نازک به منظور بررسی‌های سنگ‌نگاری و ۲۵ مقطع نازک صیقلی برای بررسی‌های کانی نگاری تهیه شد. برای ارزیابی پتانسیل عنصر مس و عناصر همراه و بررسی تغییرات عنصری، ۱۰ نمونه از ماسه‌سنگ‌های کانه‌دار انتخاب و برای آنالیز با طیف سنج جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) مدل ME-02-MAD به آزمایشگاه معدنی زرآزما ارسال گردید . همچنین برای بررسی زمین‌شیمی سنگ میزبان، ۷ نمونه ماسه‌سنگی با کمترین مقدار سیمان کربناتی با طیف سنج فئورسانس(XRF) مدل AF-01-Lithium fusion در آزمایشگاه نام برده تجزیه شدند نتایج به دست آمده از این تجزیه ها در جدول‌های ۱ و۲ آورده شده است.

زمین‌شناسی ناحیه‌ای و زمین‌شناسی منطقه معدنی

منطقه مورد بررسی در نزدیکی کرانه شمال شرقی قطعه لوت واقع است [۹]. در ناحیه بیرجند، بخش ائوسن پیشین شامل رخساره سنگی کنگلومرایی بامیان لایه‌های مارنی، ماسه‌سنگ و سنگ آهک نومولیت‌دار است. ائوسن میانی، مجموعه‌ای از سنگ آهک آلوئولینا و نومولیت‌دار و مارن است که پس از یک نبود رسوبی به کنگلومرا، سنگ‌های آذرآواری، مارن توفی، شیل‌های مدادی و ماسه‌سنگ قرمز می‌رسد. واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه شامل تناوب ضخیمی از ماسه‌سنگ‌-های قرمز، کنگلومرا و یک مجموعه شیل‌های نازک‌لایه در بین ماسه‌سنگ‌ها هستند. که در ادامه شرح داده می‌شوند [۱۰] (شکل ۳).

واحد سنگی E^{c1}: این واحد سنگی شامل تناوبی از کنگلومرا (دارای قطعه‌های ۳۰ تا ۴۰سانتیمتری) و ماسه‌سنگ ضخیم لایه به رنگ قرمز تا ارغوانی است. این واحد سنگی در بخش جنوب شرقی با ریختار صخره ساز به صورت بلندترین بخش منطقه دیده می‌شود.

واحد سنگی E^{c3}: این واحد سنگی شامل کنگلومرای ضخیم و درشت دانه به رنگ قرمز تا قهوه‌ای با ریختار تپه ماهوری است. قطعه‌های تشکیل دهنده‌ی این کنگلومرا شامل قلوه‌های آهکی و آتشفشانی هستند که درون سیمانی از جنس ماسه‌های لای دار_آهکی قرار دارند. چین‌های تقریبا خوابیده با ارتفاع کم و گسترش زیاد یال‌ها در این واحد دیده می‌شود.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]

جدول ۱ نتایج تجزیه نمونه‌ها با روش ICP-MS.

Element	Ag	Al	As	Ba	Be	Ca	Cd	Ce	Co	Cr	Cu	Fe
unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Dl	۰٫۱	۱۰۰	۰٫۵	۵	۱	۱۰۰	۰٫۱	۱	۱	۱	۱	۱۰۰
Method	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02
MS-8	۵٫۹	۳۵۲۶۸	۲٫۴	۱۲۰	<۱	>۱۰٪	۰٫۳۶	۲۹	۲	۳۲	۱۴۲۸۷	۹۱۱۳
MS-10	۲۰٫۷	۴۰۰۲۸	۶٫۲	۱۵۸	<۱	۷۸۸۰۳	۰٫۳۹	۳۲	۴	۳۴	۳۲۹۲۶	۱۰۱۸۳
MS-24	۳٫۶	۳۸۴۵۹	۵۷٫۸	۲۷۸	<۱	۹۲۵۴۴	۰٫۹	۲۷	۵	۳۳	۲۱۵۵۵	۱۱۱۴۵
MS-32	۹٫۳	۴۶۶۰۹	۲۳٫۴	۲۳۱	۱٫۱	۵۱۶۶۱	۰٫۷	۳۰	۸	۳۴	۱۰۷۲۳	۱۱۵۵۹
MS-33	۰٫۲۴	۸۲۹۹۳	۲٫۴	۲۴۷	<۱	۶۶۸۱۵	۰٫۲۹	۲۷	۲۵	۱۳	۳۱۳	۲۷۱۲۷
MS-58	۰٫۳۲	۳۸۶۲۲	۲٫۱	۶۱۰	<۱	>۱۰٪	۰٫۳	۳۱	۷	۷۵	۵۴۹	۱۵۸۰۶
MS-202	۵٫۸	۳۷۱۳۳	۵٫۴	۴۵۲	<۱	>۱۰٪	۰٫۴	۳۰	۳	۳۲	۱۲۷۰۶	۱۰۵۶۹
MS-203	۳۱٫۵	۴۳۱۴۵	۱۰۰	۱۶۷	۱٫۱	۷۳۸۵۹	۱٫۷	۳۳	۶	۳۱	۳۲۸۰۴	۸۹۴۵
MS-211	۸٫۴	۳۹۳۹۸	۵٫۶	۴۷۲	<۱	>۱۰٪	۰٫۴۱	۳۲	۱	۳۲	۹۰۹۲	۸۴۸۹
MS-25	۰٫۵	۵۹۲۷۰	۱۹٫۹	۱۵۷	۱٫۵	۴۷۸۲۰	۰٫۴	۴۱	۹	۴۸	۴۴۱۰	۲۱۲۴۷

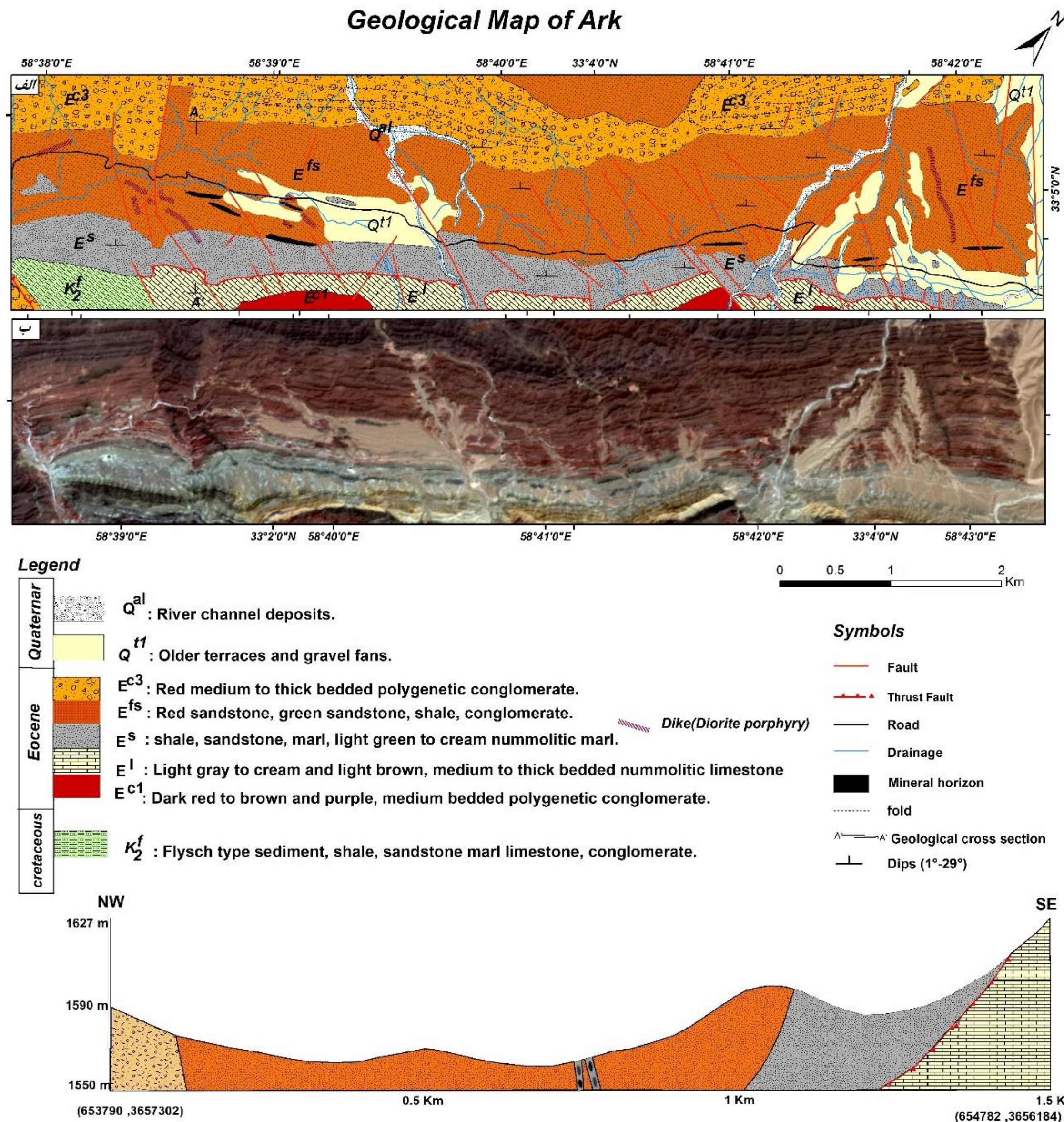
Element	K	La	Li	Mg	Mn	M0	Na	Ni	P	Pb	S	Sb
unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Dl	۱۰۰	۱	۱	۱۰۰	۵	۰٫۵	۱۰۰	۱	۱۰	۱	۵۰	۰٫۵
Method	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02
MS-8	۷۷۵۸	۱۷	۲۸	۶۱۲۴	۵۲۸	۰٫۵۱	۱۱۹۳۰	۱۳	۲۹۸	۵	۴۵۵	۰٫۸۷
MS-10	۱۰۵۸۸	۱۹	۳۲	۸۳۲۵	۴۹۵	۰٫۶	۱۰۹۰۲	۱۶	۴۹۷	۴۳	۴۶۳	۰٫۹۵
MS-24	۸۱۰۱	۱۶	۳۰	۶۷۶۶	۵۰۶	۰٫۵	۱۱۹۸۲	۱۵	۳۰۳	۱۴	۵۱۰	۰٫۹۸
MS-32	۱۰۹۶۲	۱۹	۳۸	۹۳۰۰	۳۲۵	<۰٫۵	۱۳۲۴۲	۱۶	۳۱۴	۵	۴۳۹	۰٫۹
MS-33	۲۰۵۸	۱۵	۶۵	۲۰۰۰۰	۵۲۳	۰٫۵	۳۳۶۶۸	۱۵	۶۶۹	۴	۳۵۲	۰٫۸
MS-58	۶۷۲۵	۱۷	۳۰	۹۷۸۶	۸۷۳	<۰٫۵	۱۲۷۶۷	۲۵	۳۳۶	۴	۵۳۴	۰٫۸۱
MS-202	۹۴۲۸	۱۸	۲۹	۷۳۲۲	۶۵۷	<۰٫۵	۱۱۰۲۹	۱۴	۲۷۸	۵	۵۰۲	۰٫۸۴
MS-203	۱۱۵۶۳	۱۹	۳۷	۸۶۶۸	۴۶۴	۰٫۵۵	۱۱۸۹۵	۱۸	۴۴۹	۵۱	۵۵۱	۰٫۹۵
MS-211	۹۴۸۰	۱۹	۳۰	۷۳۲۰	۶۹۳	<۰٫۵	۱۱۵۹۲	۱۵	۲۸۰	۵	۶۳۲	۰٫۹۴
MS-25	۱۸۳۳۷	۲۴	۴۰	۱۲۶۸۹	۳۱۰	<۰٫۵	۱۱۳۷۹	۲۶	۴۶۷	۴	۳۵۴	۰٫۶۷

Element	Sc	Sr	Th	Ti	U	V	Y	Yb	Zn	Zr
unit	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Dl	0٫5	2	5	10	5	1	0٫5	0٫2	1	5
Method	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02	ME-02
MS-8	۴٫۷	۱۳۷	<۵	۱۹۴۵	<۵	۳۴	۱۳	۱٫۲	۲۵	۵۰
MS-10	۵٫۷	۱۵۰	<۵	۲۲۳۷	<۵	۶۲	۱۳	۱٫۲	۵۳	۶۳
MS-24	۵٫۱	۱۵۰	<۵	۱۹۴۸	<۵	۴۱	۱۲	۱٫۱	۵۰	۵۲
MS-32	۶	۱۳۲	<۵	۲۴۱۴	<۵	۷۱	۱۲	۱٫۲	۶۴	۶۶
MS-33	۱۴٫۵	۲۸۱	<۵	۴۶۴۰	<۵	۷۸	۱۸	۱٫۸	۲۵۷	۱۰۴
MS-58	۶٫۳	۱۹۴	۶	۲۶۷۷	<۵	۴۷	۱۷	۱٫۵	۴۱	۵۸
MS-202	۵٫۱	۱۹۰	<۵	۲۱۲۹	<۵	۶۳	۱۳	۱٫۲	۳۲	۵۶
MS-203	۵٫۹	۱۵۴	<۵	۲۲۸۲	<۵	۷۰	۱۴	۱٫۴	۷۱	۷۱
MS-211	۵٫۱	۱۶۷	<۵	۲۳۲۸	<۵	۶۹	۱۳	۱٫۲	۵۹	۶۳
MS-25	۹٫۴	۱۳۸	<۵	۳۵۶۴	<۵	۸۱	۱۴	۱٫۷	۴۸	۹۰

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]

جدول۲ نتایج تجزیه نمونه‌ها با روش XRF

Element	SiO2	Al2O3	BaO	CaO	Fe2O3	K2O	MgO	MnO	Na2O	P2O5	SO3	TiO2	LOI	Cu
Unite	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪
DL	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۵
Scheme	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01
MS-53	۵۷/۷۸	۹/۱۶	<	۱۲/۷۸	۲/۱۹	۱/۳۳	۱/۸۹	۰/۰۹	۱/۳۹	<	<	۰/۴۷	۱۲/۰۲	۰/۷۴
MS-17	۵۲/۶	۹/۸۱	<	۱۴/۰۱	۱/۹۱	۱/۹۷	۲/۰۷	۰/۰۹	۱/۲۵	<	<	۰/۴۷	۱۳/۵۵	۱/۲
MS-15	۶۲/۲۱	۹/۴	<	۹/۶	۳/۲۴	۱/۴۵	۲/۰۳	۰/۰۶	۱/۵۷	۰/۰۶	<	۰/۵۵	۹/۸۲	<
MS-65	۵۳/۵۵	۸/۳۶	<	۱۶/۵۱	۲/۱۹	۱/۴۳	۱/۶	۰/۰۸	۱/۴۱	۰/۰۷	<	۰/۳۶	۱۴/۳	<
MS-30	۶۳/۳	۸/۰۲	<	۱۱/۱۹	۲/۹۷	۱/۰۶	۱/۵۳	۰/۰۵	۱/۵۱	۰/۰۵	<	۰/۵۸	۹/۷۴	<
MS-210	۴۹/۹	۷/۶۴	<	۱۷/۹۳	۱/۲۶	۱/۳۹	۱/۳۸	۰/۱۲	۱/۲۷	<	۰/۰۵	۰/۳۷	۱۶/۱۲	۲/۵۹
MS-20	۵۲/۹۶	۸/۸۷	<	۱۵/۴۶	۳/۲۱	۱/۴۶	۲/۲۳	۰/۱۲	۱/۳۵	۰/۰۹	<	۰/۴۹	۱۳/۷۸	<



شکل۳ الف) نقشه زمین‌شناسی نهشته معدنی آرک. ب) تصویر ماهواره‌ای پردازش شده ۷۴۲ ماهواره لندست.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]

واحد سنگی E^{fs}: این واحد سنگی میزبان رخداد مس آرک بوده و شامل سنگ‌های تخریبی چون لای سنگ، ماسه‌سنگ و کنگلومراست. روند کلی این واحد شمال‌شرقی ـجنوب‌غربی بوده که توسط گسل‌هایی با روند شمال‌غرب-جنوب‌شرق قطع شده است. این واحد به طور عمده از ماسه سنگ قرمز رنگ اکسایشی تشکیل شده است که در بخش‌هایی به دلیل احیایی شدن به رنگ خاکستری دیده می‌شود. کانی-سازی مس در افق‌های احیایی نام برده رخ داده است (شکل۴).

سنگ میزبان کانسارهای رسوبی نوع سرخ لایه ماسه‌سنگ، کنگلومرا وآرکوز مربوط به محیط‌های با انرژی بالا با خاستگاه قاره‌ای هستند [۱۱]. همچین بر اساس نظر هیتزمن و همکاران [۱۲] کانسارهای رسوبی سرخ لایه در فصل مشترک ماسه سنگ و کنگلومرای سرخ اکسایشی (هماتیت‌دار) و خاکستری به نسبت احیایی که به طور معمول پیریت دارند تشکیل می-شوند.

رخداد مس آرک، در بخش بالایی ماسه‌سنگ‌های واحد E^{fs} به سن ائوسن [۱۰] وجود دارند. بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی، نوع ماسه‌سنگ موجود از نوع خرده سنگی (لیت ارنایت) و تیره (گری وک) تشخیص داده‌شده است و کانی‌های اصلی سنگ کوارتز، چرت و خرده‌سنگ و کانی‌های فرعی شامل مسکویت، کانی‌های رسی و کانی‌های کدر تعیین گردید. سیمان در این ماسه‌سنگ‌ها از نوع کربناتی است. از نظر بافتی، این سنگ‌ها از نوع نیمه بالغ تا نابالغ هستند (شکل ۵).

واحد سنگی El: این واحد سنگی شامل سنگ‌آهک متوسط‌لایه با ضخامت متغیر و بصورت نواری است. این واحد در بخش جنوبی منطقه با روند شمال شرقی_ جنوب غربی به رنگ کرمی تا قهوه‌ای کم‌رنگ با ریختار صخره ساز دیده می‌شود. میان‌لایه‌هایی از آهک سنگواره‌دار(نومولیت) در این واحد دیده می‌شود که بر این اساس می‌توان سن این آهک‌ها را مربوط به پالئوسن- ائوسن پیشین در نظر گرفت [۱۳]. مرز این واحد با واحد های آواری کنار آن (E^{fs}) بصورت رواندگی است.

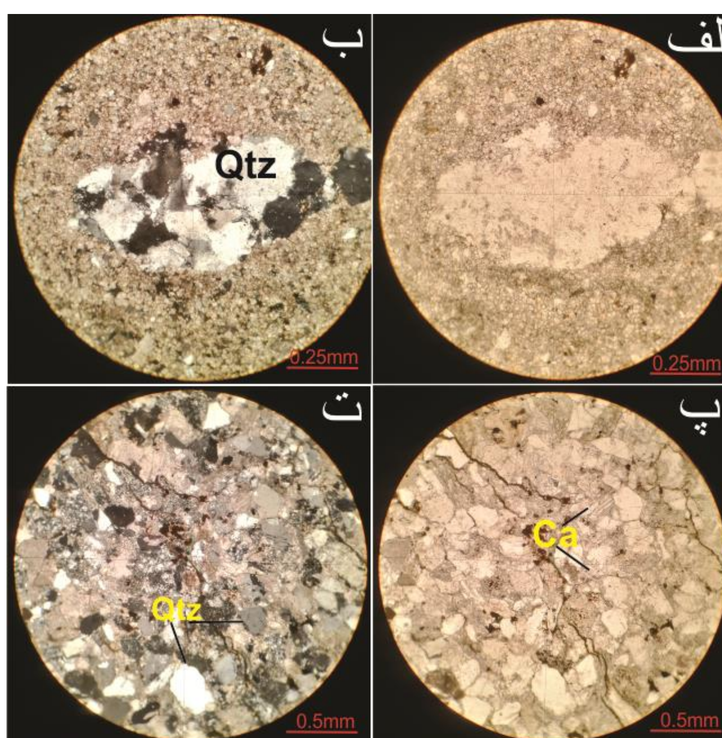
محیط رسوبگذاری

براساس بررسی‌های انجام شده در این منطقه [۱۴]، محیط رسوبگذاری برپایه‌ی تفکیک رخساره‌های سنگی، تغییرات عمودی و جانبی رخساره‌ای و نیز اختصاصات سنگ‌نگاری آنها مشخص شده است. رخساره‌های این منطقه در دو محیط قاره-ای و دریایی برجای گذاشته شده‌اند، که هر یک مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی ویژه‌ای دارند. نهشته‌های قاره‌ای برش مورد بررسی در سامانه رودخانه بریده بریده و نواحی ساحلی برجای گذاشته شده‌اند [۱۴]. وجود ساختارهای رسوبی چون موج نقش، شیار نقش، قالب قاشکی و ردپای سنگواره تشکیل سنگ میزبان کانی‌سازی در محیط ساحلی و جزر و مدی را تایید می‌کند (شکل ۶). برای تعیین سنگ خاستگاه سنگ میزبان از نمودار‌دو تابعی مرجع [۱۵] استفاده گردید.



شکل۴ الف) نمایی از توالی سرخ لایه به سن ائوسن [۱۰] دید به سمت شرق. ب و پ) بخش‌های قطعه‌های سنگواره گیاهی و حضور کانی‌سازی پیرامون.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]



شکل ۵ تصویر میکروسکوپی الف وب) ماسه سنگی تیره (در نور قطبیده صفحه‌ای، ppl) گری وک؛ پ و ت) ماسه سنگ خرده سنگی (در نور قطبیده متقاطع، xpl) (Qtz: کوارتز، Chl: کلریت، Fe-oxide: اکسید آهن، Ca: کربنات و Rf: خرده سنگ [۱۳]).



شکل۶ نمایی از ساخت‌های رسوبی موجود در منطقه مورد بررسی؛ الف) طبقه‌بندی، ب، پ و ت) شیار نقش، ث) موج نقش و ج) قالب قاشکی.

نمودار دو تابع تفکیک کننده مرجع [۱۶] برای شناسایی رسوب‌هایی است که خاستگاه اولیه آن‌ها سنگ‌های آذرین مافیک، حدواسط، فلسیک و رسوبی کوارتزی است. در این نمودار از اکسیدهای MgO و Fe_2O_3, Na_2O, Al_2O_3, K_2O,

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]

TiO_2, CaO برای تفکیک بین خاستگاه‌های چهارگانه استفاده شده است. داده‌های مربوط به اکسیدهای عناصر اصلی نمونه-های مورد بررسی، در نمودار در گستره حدواسط قرار می‌گیرند (شکل ۷).

کانه‌زایی و دگرسانی

کانی‌زایی مس در منطقه مورد بررسی در بخش بالایی ماسه-سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه وجود دارند. در بخش‌هایی از ماسه‌سنگ‌ها که انبوهه های سنگواره گیاهی دیده می‌شود، دگرسانی شستشو (Bleaching) رخ داده است و سنگ احیایی شده و به رنگ خاکستری دیده می‌شود. کانی‌سازی مس در این افق‌های احیایی وجود دارد. در این منطقه، دست کم دو افق احیایی وجود دارند که به صورت لایه‌ای و با کشیدگی شمال-شرقی_جنوب‌غربی دیده می‌شوند (شکل ۳ و ۴). ضخامت افق-ها بین ۳ تا ۵ متر و طول آنها چند صد متر است که گاهی به یک سمت باریک شده و سرانجام به پهنه ماسه‌سنگ سرخ تبدیل و پس از طی مسافتی دوباره ظاهر می‌شوند. کانی‌سازی به صورت عدسی درون این افق‌های احیایی انجام شده است. فاصله این دو افق حدود ۸۰ تا ۱۰۰ متر است، در بخش‌هایی به دلیل جابه‌جایی گسلی به هم ریختگی‌هایی دارند و به ظاهر سه افق دیده می‌شود. بیشتر این گسل‌ها دارای راستای شمال‌غربی _جنوب‌شرقی هستند. نوع ماسه‌سنگ موجود در ایـن منطقـه از نـوع خرده سنگی دارای سیمان کربناتی و از نظر بافتی، نیمه بالغ تا نابالغ تشخیص داده‌شده است.

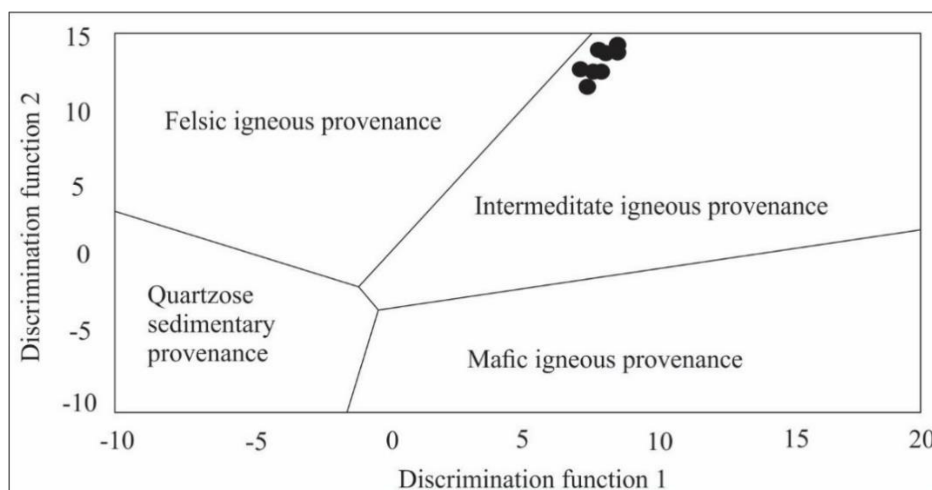
وجود آثار و بقایای گیاهی در افق‌های کانه‌زایی از عوامل مهم احیاکننده محیط و کنترل کننده کانه‌زایی بوده که در دیگر کانسارهای مس با میزبان ماسه‌سنگی سرخ نیز گزارش شده است [۲، ۱۶].

افق‌های ماسه سنگی دارای کانه‌زایی شامل سه پهنه هستند و در مراحل مختلف درونزایی و فرایندهای دگرسانی به شرح زیر تشکیل شده‌اند (شکل ۸) که ادامه شرح داده می‌شوند.

۱) پهنه قرمز اکسایشی افق‌های احیایی را از بالا و پایین در برمی‌گیرد. رنگ این بخش از قرمز تا قهوه‌ای روشن تغییر می-کند، و دلیل حضور مقادیر زیادی هیدروکسید آهن است. هیدروکسیدهای آهن پیرامون قطعه‌های آواری، به‌ویژه دانه‌های کوارتز وجود دارند. ترکیب این بخش ماسه سنگ خرده سنگی است تنها کانی مس‌دار موجود در این بخش نئوتاسیت است که به طور ثانویه در بخش‌های نزدیک به پهنه کانه‌زایی شده تشکیل می‌شوند.

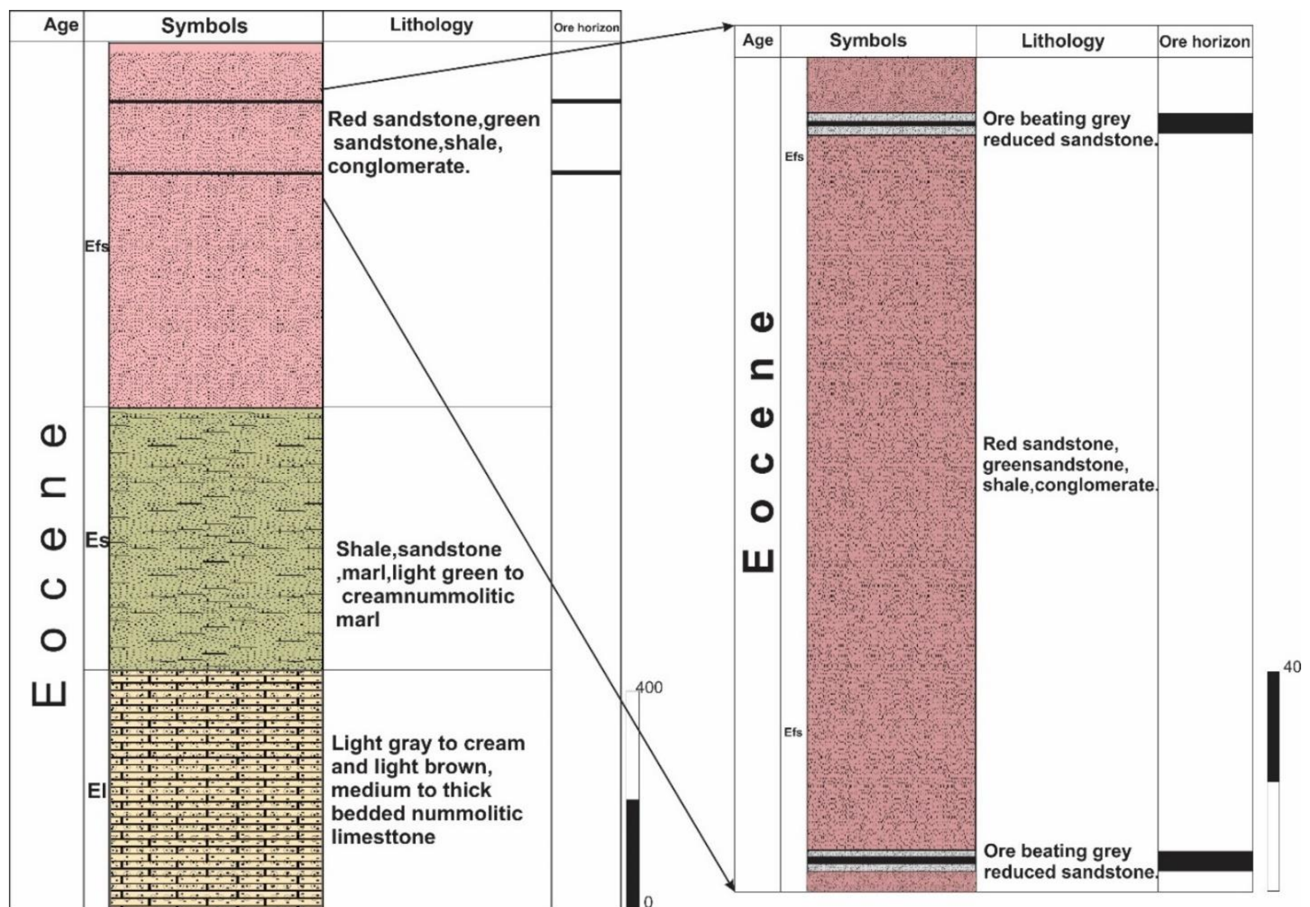
۲) پهنه شسته‌شده در واقع بخشی از توالی لایه قرمز است که دچار دگرسانی شده به طوری‌که در اثر سیال احیا کننده، به رنگ سفید تا خاکستری تبدیل شده است. در این پهنه، اکسیدهای آهن شسته شده‌اند و در نتیجه، از نظر آهن تهی شده است.

۳) پهنه احیایی کانه‌زایی شده به شکل عدسی، درون بخش شسته شده افق‌های احیایی و در بخش‌هایی با بیشترین مقدار قطعه‌های سنگواره گیاهی، تشکیل شده‌اند.



شکل ۷ نمودار تابع تفکیکی [۱۶] که براساس آن تجزیه زمین شیمی عناصر اصلی نمونه‌های برداشت شده در گستره حد واسط قرار می‌گیرد.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]



شکل ۸ ستون چینه‌شناسی عمومی از رخداد معدنی مس آرک و موقعیت افق‌های احیایی کانه‌دار در آن.

مهم‌ترین عامل در تشکیل این پهنه، فراوانی قطعه‌های سنگواره گیاهی به عنوان عامل احیایی است. سنگواره‌های گیاهی با ایجاد یک محیط احیا پیرامون خود نخست موجب دگرسانی شستشو و تشکیل پهنه شسته شده و سپس باعث ته-نشست مس و سایر عناصر فلزی موجود در سیال اکسایشی عبور کننده می‌شوند. کانی‌زایی در رخداد معدنی مس آرک با مواد آلی به ویژه سنگواره‌های گیاهی کنترل می‌گردد. این ویژگی در کانسارهای نوع سرخ لایه (RB) چون کانسارهای نیو مکزیکو وآند مرکزی دیده می‌شود [۱۷، ۱۸].

وجود پیریت‌های فرامبوئیدی در افق‌های کانه‌دار و نیز سالم ماندن ساختارهای سلولی جانشین شده با سولفیدها نشان می‌دهد که این کانسار در مراحل اولیه درونزایی و پیش از تدفین عمقی تشکیل شده است. ماده معدنی بدون کنترل ساختاری ـگسلی به شکل عدسی و هم راستا با لایه‌بندی و در افق چینه‌ای ویژه شکل گرفته است.

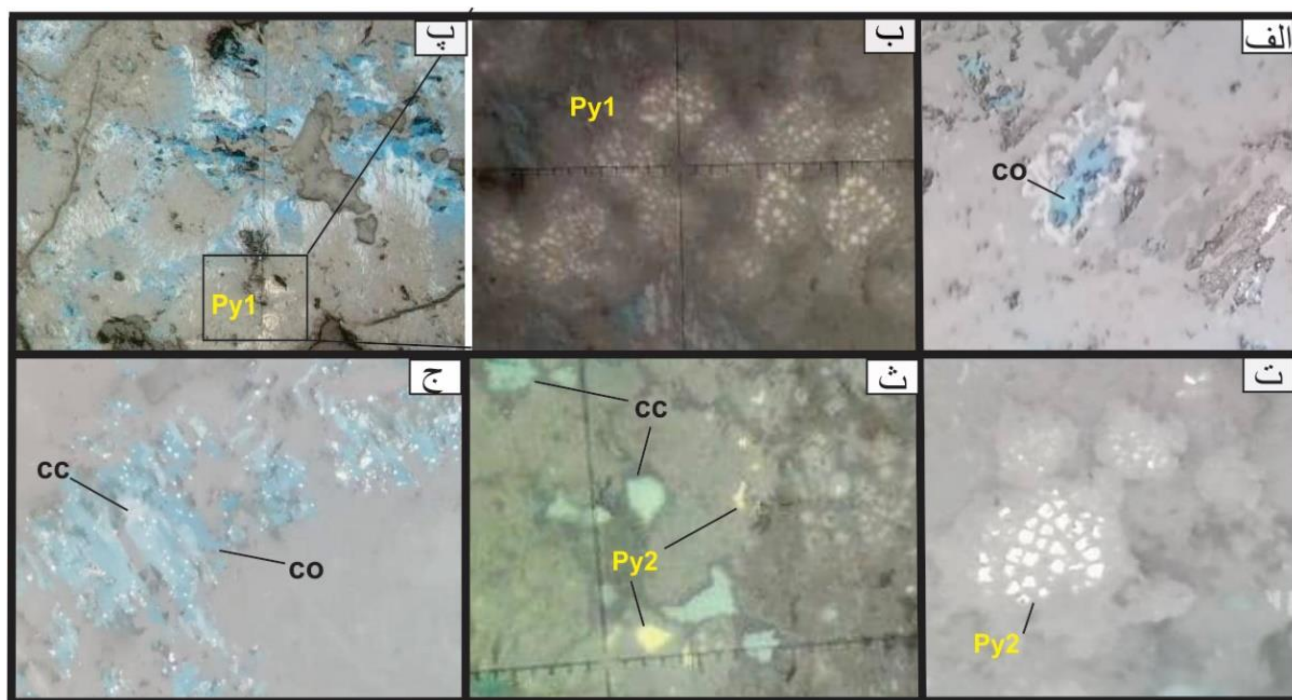
کانی‌شناسی و ساخت و بافت

از نظر کانی‌شناسی، کانی‌های اولیه قابل دیده در این منطقه عبارتند از کالکوسیت و پیریت (نسل I و II). کانی‌های ثانویه شامل کوولیت، مالاکیت، کریزوکلا، آزوریت، آتاکامیت و نئوتاسیت هستند. بافت‌های اولیه مانند بافت دانه‌پراکنده، فرامبوئیدی و سیمان بین‌دانه‌ای و بافت‌های ثانویه چون جانشینی (لبه‌ای، شبکه‌ای، سلولی، جزیره‌ای یا باقیمانده) از مهمترین بافت‌های موجود در این منطقه هستند (شکل ۹ و ۱۰).

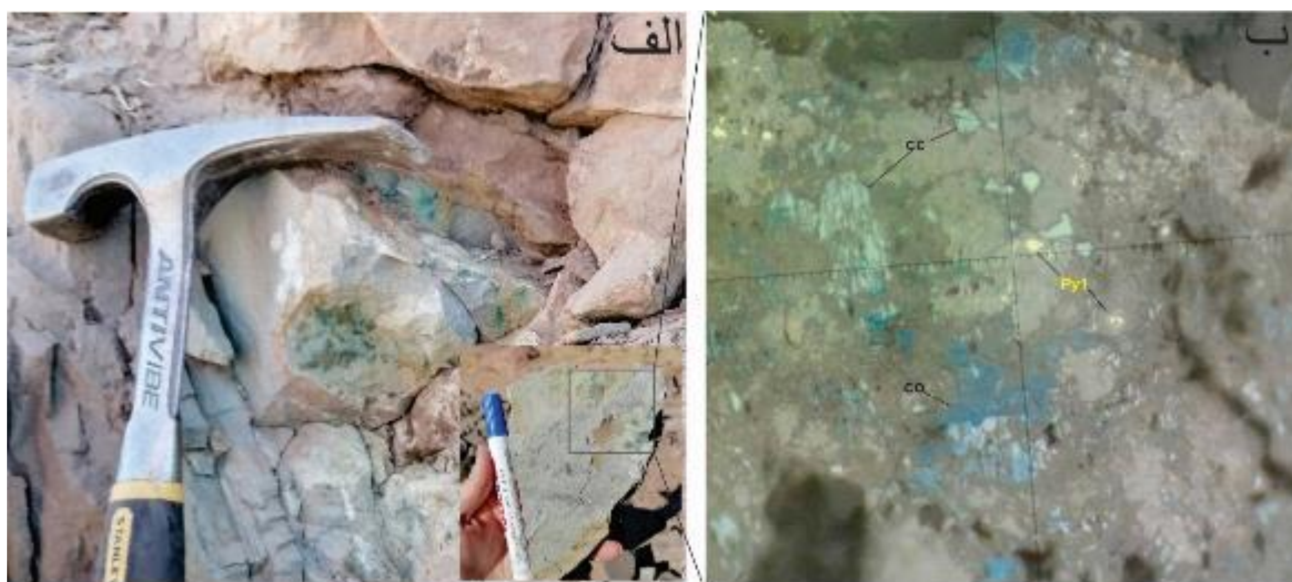
بافت جانشینی مهمترین بافت قابل دیده در ماده معدنی است و به صورت‌های جانشینی سلولی، لبه‌ای، شبکه‌ای، جزیره‌ای یا برجای‌مانده در رخداد معدنی مس آرک دیده می-شود. مهمترین کانی سولفیدی مس‌دار در این منطقه کالکوسیت بوده که شامل دو نسل است؛ نسل اول به صورت بین دانه‌ای، انتشاری و جانشینی سلولی است که در آن

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]

کالکوسیت جانشین بافت‌های سلولی شده است (سنگواره‌های گیاهی با ایجاد محیط احیایی شرایط مناسبی را برای جانشینی کانی‌های سولفیدی ایجاد می‌کند [۱۹]). کالکوسیت‌های نسل دوم جانشین پیریت‌های فرامبوئیدی شده‌اند. کالکوسیت در مراحل میانی تا پایانی درونزایی به‌صورت بافت جانشینی تشکیل شده است.



شکل ۹ الف ،ب) نمایی از پیریت فرامبوئیدی که در مرحله درونزایی اولیه و پس از ته نشست ژل سولفیدی از آن متبلور شده است. پ) بافت جزیره‌ای. ت) پیریت های خودشکل نسل دوم که از پیریت های نسل اول تشکیل شده‌اند. ث) بافت دانه پراکنده سولفیدهای مس و پیریت‌های خودشکل. ج) بافت جانشینی (شبکه‌ای و سلولی) سولفید های مس(کالکوسیت، کوولیت). cc: کالکوسیت، co:کوولیت، py: پیریت [۱۳]).



شکل ۱۰ نمایی از سولفید های مس و پیریت در نمونه دستی و مقطع همان نمونه (نشانه‌های اختصاری مانند شکل ۹).

جانشینی پیریت با کانی‌های سولفیدی مس‌دار از جمله کالکوسیت رخ داده و باقیمانده پیریت در میان کانی‌های نام برده به صورت بافت جزیره‌ای قابل مشاهده است. طی فرایند جانشینی ثانویه نیز جانشینی کانی‌های سولفیدی مس‌دار اولیه با کانی‌های سولفیدی ثانویه چون کوولیت رخ داده است.

بافت انتشاری در بیشتر کانسارهای روزادی دیده می‌شود و از بافت‌های معمول در کانسارهای کمربند مس کنگو است [۲۰]. این بافت در مقاطع بصورت جانشینی پیریت دانه پراکنده با سولفیدهای مس‌دار از جمله کالکوسیت و همچنین نهشت سولفیدها که در فضای خالی بین دانه‌های تخریبی سنگ میزبان تشکیل می‌شوند قابل مشاهده است.

بافت دانه پراکنده بیشتر پیرامون پهنه احیایی کانه‌زایی شده (غنی از سنگواره گیاهی) و گاه در بخش‌های نفوذ پذیر دارای مواد آلی دیده می‌شود، قرارگیری سولفیدهای مس اولیه در فضای خالی میان دانه‌ها به‌صورت سیمان میان‌دانه‌ای می‌تواند بافت دانه پراکنده ایجاد کند [۲۱]. در منطقه مورد بررسی، سولفیدهای مس وپیریت دارای این بافت هستند. کالکوسیت اولیه دانه پراکنده جانشین پیریت دانه پراکنده شده است.

پیریت دانه پراکنده موجود در رخداد مس آرک دارای دو نسل است. نسل اول پیریتی است که در مراحل اولیه درونزایی و پس از ته‌نشست ژل سولفیدی به صورت فرامبوئیدی از ژل سولفیدی متبلور شده‌است [۲۲]؛ پیریت نسل دوم پیریت‌های خودشکلی هستند که از پیریت‌های نسل اول تشکیل می‌شوند.

زمین ساخت

کانسارهای مس نوع سرخ لایه در حوضه‌های در برگرفته شده با گسل‌ها در محیط‌های متنوع زمین‌ساختی شامل کافت‌ها، حوضه‌های بین کوهستانی در پهنه‌های گسترده کششی و حوضه‌های پیش بوم (Foreland) مولاسی به وجود می‌آیند [۳].

گستره مس آرک در مرز بین قطعه لوت و پهنه سیستان قرار دارد براساس جدیدترین پژوهش زمین‌ساختی که در این منطقه [۹]، یک ساختار قوسی شکل در شمال بیرجند وجود دارد که در اثر چرخش قطعه لوت در پی حرکت رو به غرب قطعه افغان و با ورود واحدهای فلیشی پهنه زمین درز سیستان به درون محیط کربناتی این منطقه تغییر چهره داده و ساختار قوسی به خود گرفته است. در اینجا الگوی خمش از نوع کمانشی (Buckling) بوده، پهنای این ساختار به طور متوسط ۱۲ کیلومتر است و از این رو شاید بتوان آن را یک اوروکلاین با خمش تا ۹۰ درجه دانست [۹]. با توجه به توالی موجود و زمین‌ساخت دیرینه این منطقه، به احتمال بسیار این نهشته در بخش‌های کششی موجود در منطقه تشکیل شده است.

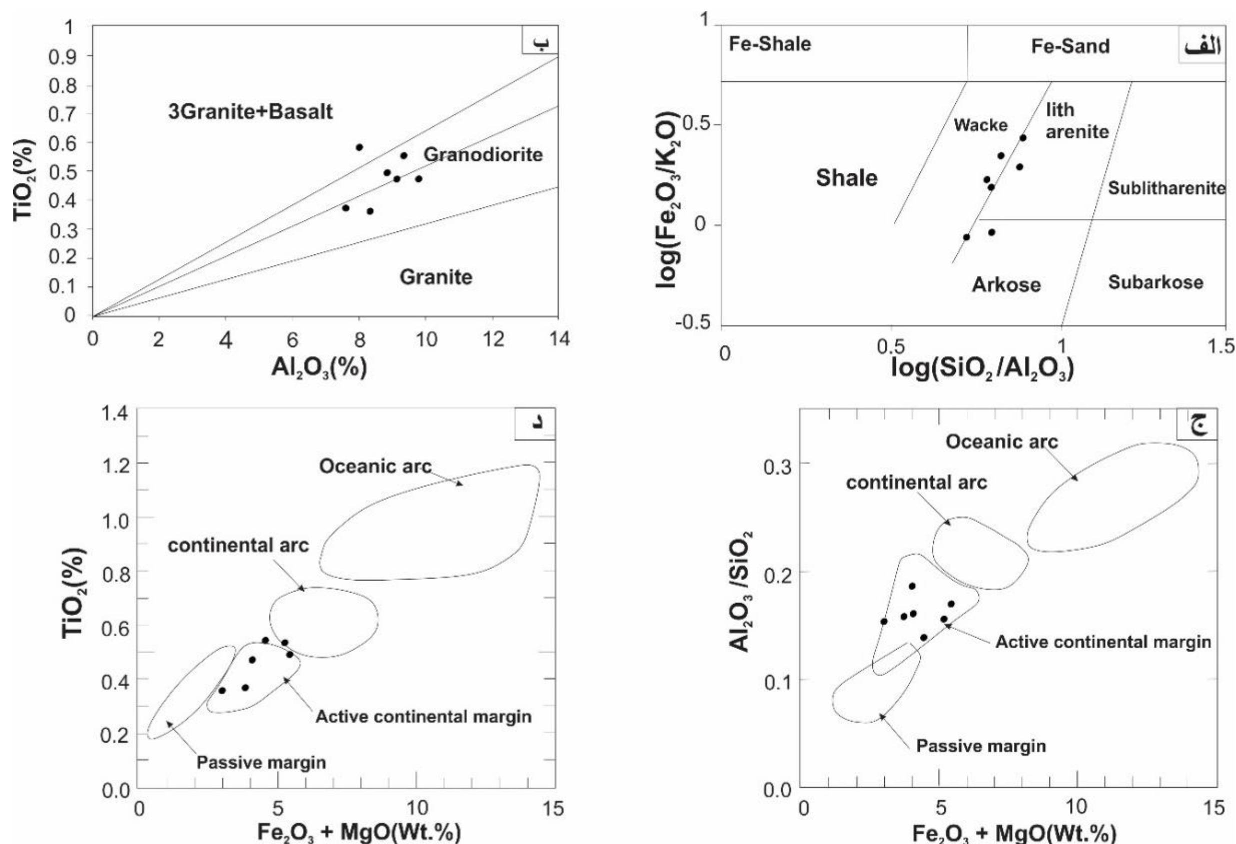
زمین‌شیمی سنگ میزبان و ماده معدنی

نتایج سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که نمونه‌های ماسه‌سنگ مورد بررسی از اجزای اصلی زیرتشکیل شده‌اند: ۱) کوارتز بیشتر به صورت تک بلور با خاموشی مستقیم و کمی موجی و هم‌چنین بسبلور (شکل ۵)، ۲) خرده سنگ‌ها به ترتیب فراوانی شامل خرده سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آتشفشانی و ۳) فلدسپات-ها که نسبت به کوارتز و خرده سنگ کمتر هستند فراوانی پلاژیوکلاز نسبت به فلدسپات پتاسیم بیشتر است.

واحدهای سنگ میزبان کانی‌سازی براساس نمودار رده‌بندی ماسه‌سنگ‌ها [۲۳] در گستره ماسه سنگ‌های خرده سنگی و تیره قرار دارند (شکل ۱۱ الف). برای تعیین خاستگاه ذرات آواری ماسه‌سنگ‌ها از نمودار دو متغیره TiO_2 نسبت به Al_2O_3 [۲۴] استفاده شد (شکل ۱۱ ب). بر این اساس، خاستگاه ماسه‌سنگ‌ها در منطقه مورد بررسی سنگ‌های گرانودیوریتی تشخیص داده شد. با توجه به پایین بودن مقدار کبالت در سنگ‌های آذرین اسیدی، مقادیر کم این عنصر در نمونه‌های معدنی نهشته آرک قابل توجیه است.

بر پایه نمودار مرجع [۲۵] و تغییرات مقدار عناصر اصلی، می‌توان سنگ‌های آواری جزایر کمانی اقیانوسی، جزایر کمانی قاره‌ای، کرانه فعال قاره و کرانه غیر فعال قاره‌ای را از هم تفکیک نمود. برای تعیین محیط زمین‌ساختی ماسه‌سنگ‌های میزبان کانی‌سازی، از نمودار TiO_2 نسبت به مجموع Fe_2O_3 و MgO و همچنین نمودار SiO_2/Al_2O_3 نسبت به Fe_2O_3+MgO [۲۵] استفاده گردید که بر این اساس، کرانه فعال قاره محیط زمین‌ساختی زمان تشکیل سنگ میزبان تشخیص داده شد (شکل‌های ۱۱ پ و ت).

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]



شکل ۱۱ الف) نمودار رده‌بندی ماسه‌سنگ‌ها [۲۵]، ب) نمودار دو متغیره TiO_2 نسبت به Al_2O_3 [۲۴] برای تعیین خاستگاه ذرات آواری ماسه‌سنگ‌ها، پ و ت) نمودار TiO_2 نسبت به مجموع Fe_2O_3 و MgO و نمودار Al_2O_3/ SiO_2 نسبت به Fe_2O_3+MgO [۲۴] برای تعیین محیط زمین ساختی ماسه‌سنگ‌ها.

بحث

خاستگاه و چگونگی تشکیل

به باور برخی پژوهشگران [۲، ۱۶]، مس رسوبی در جریان فرایند درونزایی اولیه در ماسه سنگ‌ها ایجاد می‌شوند. مهم‌ترین خاستگاه سیال‌های کانه‌ساز در کانسارهای چینه‌سان نوع سرخ لایه آب‌زدایی و آبکافت لایه‌های سرخ افق اکسایشی موجود در پایین افق‌های کانه‌زایی شده است. در مرحله همزمان با ته‌نشست رسوب‌ها، همراه قطعه‌ها و دانه‌های آواری، کانی‌های آواری سیلیکاتی ناپایداری چون هورنبلند، پلاژیوکلاز، بیوتیت و فلدسپار قلیایی نیز ته‌نشین شده‌اند که همه دارای مقادیری از مس و سایر فلزهای پایه و کمیاب در ساختار خود هستند. مس موجود در این کانی‌ها در اثر درونزایی اولیه و آبکافت، از ساختار آنها آزاد شده و در سیال کانه‌ساز به صورت محلول وارد و حمل می‌شود. مس موجود در ساختار این کانی‌ها می‌تواند مس سیال کانه‌ساز در کانسارهای مس رسوبی با میزبان ماسه سنگی باشد. به باور براون [۷]، طی فرایند سرخ شدگی و تخریب کانی‌های سیلیکاتی، مقدار قابل‌توجهی از مس و سایر فلزها آزاد می‌شود که می‌تواند خاستگاه مس برای تشکیل این نوع کانسارها باشد [۷].

در مراحل بعدی درونزایی، طی تبلور و بلوغ اکسیدهای آهن بی شکل و تبدیل آنها به هماتیت و همچنین تبدیل اسمکتیت به ایلیت، فلزهای درون این کانی‌ها، از جمله مس و نقره، آزاد و وارد سیال اکسایشی شده و می‌توانند توسط آن حمل شوند. در رخداد مس‌آرک، سیال اکسایشی کانه‌دار در اثر فشار بار سنگ ایستایی لایه ای سرخ ماسه‌سنگی ایجاد شده، مس و سایر فلزهای آزاد شده از کانی‌های سیلیکاتی ناپایدار را به صورت کمپلکس کلریدی حمل می‌کند. افزون بر این، وجود مقدار زیادی از مواد آلی در لایه‌های قرمز باعث می‌شود که آب میان سازندی پیرامون بخش‌های غنی از سنگواره گیاهی در اثر مواد آلی، سیال احیایی را به وجود آورد. در واقع، باکتری‌های بی هوازی سولفات موجود در آب میان سازندی را به H_2S احیا

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]

نموده و در نتیجه افزون بر ایجاد گوگرد، باعث دگرسانی شستشو در افق غنی از سنگواره گیاهی می‌شوند [۷]. در این حالت، اکسیدهای آهن موجود در بخش‌های احیا شده، در کنار گوگرد یا به صورت پیریت درونزاد ته نشست پیدا نموده و یا از سنگ شسته شده و در مرز محیط احیا و اکسیدشده تمرکز می‌یابند. سیال اکسایشی کانه‌دار در مسیر چرخش خود درون لایه‌های قرمز، با رسیدن به افق‌های احیایی غنی از مواد آلی و سنگواره گیاهی و در اثر برخورد با سیال احیایی در این بخش، باعث ناپایدار شدن کمپلکس‌های کلریدی حامل مس می‌شود و در نتیجه، سولفیدهای مس ته‌نشین و جانشین بخش‌های مختلف سنگواره‌های گیاهی می‌گردند. این فرایند به طور معمول کمی پس از شروع شستشوی محیط احیایی مناسب برای ته نشست کانی‌های سولفیدی رخ می‌دهد.

براساس بررسی‌های انجام شده و رسم توالی همبرزادی، کانی‌های سولفیدی چون کالکوپیریت و کالکوسیت با بافت‌های جانشینی، سیمان میان دانه‌ای و دانه پراکنده، در مرحله درونزایی میانی و پیش از درونزایی تدفینی تشکیل می‌شوند (شکل ۱۲).

مقایسه رخداد مس آرک با کانسارهای جهانی نوع سرخ لایه

بررسی‌های انجام شده پیرامون رخداد مس آرک همراهی کانه-زایی مس با سنگواره‌های گیاهی را نشان می‌دهد. با توجه به بررسی‌های کانسارهای مشابه در دیگر نقاط جهان (جدول ۳) که نشان‌دهنده ارتباط میان این پدیده و تشکیل کانسار مس رسوبی است، سنگواره‌های گیاهی در تشکیل سیال احیایی نقش داشته و موجب کانه‌زایی مس طی درونزایی میانی شده-اند. مقایسه کانسارها از نظر موقعیت، سن، سنگ‌شناسی، کانی-شناسی ماده معدنی، ساخت و بافت، چینه‌شناسی، محیط رسوبی، عامل‌های کنترل کننده کانه‌زایی و غیره بوده است

بررسی‌های انجام شده کانه‌زایی مس منطقه را در ائوسن از نوع مس رسوبی سرخ لایه نشان داده است که در توالی تخریبی لایه‌های قرمز در مرز بین قطعه لوت و پهنه سیستان، در جنوب غرب بیرجند در طول بیش از چندین کیلومتر گسترش یافته است.

Mine \ Stag		Per_mineralization		Mineralization		Post_mineralization	
		Syn depositional	Diagenesis			Supergene	
			Early diagenesis	Middle diagenesis	Late diagenesis	Sulfide	Oxide
Minerals procces	Redding						
	Calcite cementation						
	Organic destruction						
	Porosity generation						
	Bleaching						
	compacton						
	Iron Hydroxide						
	Framboidal pyrite						
	Pyrite						
	Calcocite						
	Covellite						
	Malachite						
	Goethite						
	Neotocite						
	Atacamite						
	Azurite						
Textures	Replacement						
	Disseminated						

شکل۱۲ توالی همبرزادی کانی‌سازی در رخداد مس آرک.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]

جدول ۳ مقایسه رخداد مس آرک با کانسارهای مارکشه، تازکند، ناسیمینتو و لیسبون ولی به عنوان کانسارهای جهانی نوع سرخ لایه.

رخداد مس آرک	مارکشه	تازه کند	Lisbon Valley	ناسیمینتو	کانسار
شمال‌غرب بیرجند_ایران	شمال‌غرب راور_ ایران	شمال تبریز- ایران	یوتا - آمریکا	نیومکزیکو - آمریکا	**موقعیت**
ائوسن	ژوراسیک	میوسن	کرتاسه پیشین	تریاس	**سن**
Cu	Cu(Ag)	Cu-Ag	CU	Cu - Ag	**عناصر معدنی**
عدسی_همروند با لایه بندی	عدسی_همروند با لایه- بندی	چینه کران و هم روند با لایه بندی	عدسی_همروند با لایه- بندی	عدسی -همروند با لایه بندی	**هندسه**
ماسه سنگ	ماسه سنگ و میکرو کنگلومرا	ماسه سنگ	ماسه‌سنگ	ماسه سنگ و کنگلومرا	**سنگ میزبان**
کالکوسیت، کوولیت، پیریت، مالاکیت، آزوریت، آتاکامیت.	کالکوزیت، بورنیت، کوولیت، کالکوپیریت، مالاکیت، کریزوکلا، آزوریت، تنوریت (نقره)	کالکوسیت، دیژنیت، کوولیت، پیریت و مالاکیت	کالکوزیت، بورنیت، کالکوپیریت، مالاکیت، آزوریت، تنوریت، کوپریت، گالن، اسفالریت	کالکوزیت، بورنیت، کوولیت، کالکوپیریت، مالاکیت، آزوریت، کریزوکلا، نقره	**کانه‌شناسی**
سنگواره‌های گیاهی و پیریت	سنگواره گیاهی و پیریت درونزادی	بقایای گیاهی و پیریت درونزایی	سنگواره گیاهی، پیریت، مواد هیدروکربنی	سنگواره گیاهی و پیریت درونزادی	**عامل احیا کننده**
نفوذپذیری سنگ میزبان	نفوذپذیری سنگ میزبان	وجود عامل احیاکننده و نفوذپذیری سنگ میزبان	نفوذ پذیری‌سنگ میزبان	نفوذپذیری سنگ میزبان	**عوامل کنترل کننده کانی زایی**
جزر و مدی	جزر و مدی	کشندی	جزر و مدی	کم عمق	**محیط رسوب‌گذاری**
سرخ لایهSHC	سرخ لایهSHC	سرخ لایهSHC	سرخ لایهSHC	سرخ لایه SHC	**نوع کانه‌زایی**
این پژوهش	[۲۹]	[۲۸]	[۲۷]	[۲۶]	**مرجع**

برداشت

کانی‌سازی مس در منطقه آرک در بخش بالایی رسوب‌های تخریبی قرمز رنگ و درون افق‌های احیایی غنی از قطعه‌های سنگواره گیاهی، به عنوان عامل احیا رخ داده است. براساس بررسی‌های انجام شده از دید سنگ‌شناسی (سنگ میزبان ماسه‌سنگ خرده سنگی)، کانی‌شناسی ماده معدنی (کالکوسیت، کوولیت)، ساخت و بافت، چینه‌شناسی، محیط رسوبی (حضور ساخت‌های رسوبی چون موج نقش، قالب قاشکی و شیار نقش که بیانگر محیط ساحلی و جزر و مدی است) و عامل‌های کنترل‌کننده کانه‌زایی (وجود آثار و بقایای گیاهی به عنوان عامل اصلی احیاکننده محیط، نفوذپذیری مناسب سنگ میزبان)، همچنین دگرسانی در مرحله درونزایی و تشکیل پهنه-های شسته شده، سرخ اکسایشی و احیا کانه‌زایی شده، کانی سازی در منطقه آرک مانند کانسارهای مس رسوبی نوع است. وجود پیریت‌های فرامبوئیدی در افق‌های کانه‌دار و نیز سالم ماندن ساختارهای سلولی جانشین شده با سولفیدها جانشین نشان می‌دهد که این کانسار در مراحل اولیه درونزایی و پیش از تدفین عمقی تشکیل شده است. با توجه به کشیدگی و گسترش واحد ماسه‌سنگ قرمز در شمال بیرجند، ذخایر مشابهی از این نوع کانی‌سازی در شمال بیرجند وجود دارد، از جمله چشمه مرغو، بقی و شکسته تخته سنگ که نیازمند کارهای اکتشافی بیشتر هستند.

قدردانی

این پژوهش با پشتیبانی مالی دانشگاه فردوسی مشهد در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳/۵۴۵۳۲ انجام شده است.

مراجع

[1] Hitzman M. W., Shelley D., Bull S., *"Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through earth history"*. Economic Geology 105 (2010) 627-639.

[2] Hitzman M., Kirkham R., Broughton D., Thorson J., Selley D., *"The sediment-hosted stratiform copper ore system"*, In Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.M., R.J., Goldfarb, Richards, J.P., (Ed.), One Hundered Anniversary volume. Economic Geology, Littleton (2005) 609-612.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]

siliceous deposits, Friznok section, north of Birjand", Master's thesis, Birjand University (2016) 142 p.

[15] Roser B. P., Korsch R. J., *"Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suites using SiO2 content and K2O/Na2 Oratio"*, Journal of Geology , v. 94 (1986) 635- 650.

[16] Brown A. C., *"Refinements for footwall red-bed diagenesis in the sediment-hosted stratiform copper deposits model"*, Econ Geol, v. 100(2005) 765– 771.

[17] LaPoint D.J., *"A model for the diagenetic formation of sandstone capper deposits in sedimentary rocks of Permian and Triassic age, in New Mexico U.S.A"*, Geological Association of Canada, v. 36(1989) 357-370.

[18] Flint S., *"Sediment-hosted stratabound copper deposits of the central Andes"*, Geol. Assoc. Can, v. 36(1989) 371-398.

[19] Subias I., Fanlo I., Mateo J., *"A model for the diagenetic formation of sandstone-hosted copper deposits in Tertiary sedimentary rocks, Arago´n (NE Spain): S/C ratios and sulphur isotope systematic "*, Ore Geology Reviews, v. 23 (2003) 55–70.

[20] El Desouky H.A., Muchez P., Tyler R., *"The sandstone-hosted stratiform copper mineralization at Mwitapile and its relation to the mineralization at Lufukwe, Lufilian foreland, Democratic Republic of Congo"*. Ore Geology Reviews, v. 34(2008) 561–579.

[21] Asael D., Matthews A., Oszczepalski S., Bar-Matthews M., Halicz L., *"Fluid speciation controls of low temperature copper isotope fractionation applied to the Kupfer-Schiefer and Timna ore deposit"*. Chemical Geology , v. 262 (2009) 147-158.

[22] Love L. G., Brockley H., *"Peripheral radial texture in framboids of poly framboidal pyrite, Fortschr.Miner"*. v.50 (1973) 264-269.

[23] Herron M. M., *"Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data"* ,Journal of Sedimentary Research, v. 58(1 9 8 8) 820–829.

[24] McLennan S.M., *"Taylor, S.R.,. Th and U in sedimentary rocks: crustal evolution and sedimentary recycling"* Nature, v. 285 (1980) 621-624.

[25] Bhatia M. R., Crook K. A. W., *"Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins"*, Contributions to Mineralogy and Petrology , v. 92 (1983) 181-193.

[3] Cox D.P., Lindsey D.A, Singer D.A., Diggles M.F., *" Sediment-hosted copper deposits of the world-deposit models and database"*, U.S. Geological Survey, Canada, Open-file report (2007) 50 p.

[4] Hayes T.S., Cox D.P., Piatak N.M., Seal R.R., *"Sediment-hosted stratabound copper deposit model "*, Survey, Virginia (2015) 147 p.

[5] Arjamandzadeh R., Sharifi Tashnizi A., Ahmadi A., Mahdavi A., Tusli S., Vadbiri R., *"Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Copper-Uranium Sedimentary Deposit of Aghle Mesi, Tabas Block, Central Iran"*, Earth Science Researches, v. 11 (2019) 47-70.

[6] Maghfouri S., Rastad E., Borg G., Hosseinzadeh M. R., Movahednia M., Mahdavi A., Mousivand F., *"Metallogeny and temporal–spatial distribution of sediment-hosted stratabound copper (SSC-type) deposits in Iran; implications for future exploration"*, Ore Geology Reviews, v. 127 (2020) 103-834.

[7] Brown A.C. *"Low-Temperature Sediment-Hosted Copper Deposits, in Treatise on Geochemistry End Edition"* (2014).

[8] Kirkham R. V., *"Sediment-hosted stratiform copper. Geological Survey of Canada, Geology of Canada"* , v. 8 (1995) 223-240.

[9] Yaqoubi M., *"The amount and mechanism of shortening in the Iocene Arc carbonate platform, northwest of Birjand (in Persian) "*, Master's Thesis, Tectonics, Zahedan University(2018).

[10] Roshan Rovan. J., Shujaei Kaveh M., Behramand M., *"Geological Map 1:100,000 Mousavieh (in Persian)"*, Organization of Geology and Mineral Explorations of Iran(2006).

[11] Cox D.P., Lindsey D.A, Singer D.A., Diggles M.F., *"Sediment-hosted copper deposits of the world-deposit models and database"*, U.S. Geological Survey, Canada, Open-file report (2007)50 p.

[12] Hitzman M., Kirkham R., Broughton D., Thorson J., Shelley D., *"The sediment-hosted stratiform copper ore system. In: Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J. and Richards, J.P. (Eds.), 100th Anniversary volume"*, Society of Economic Geologists, (2010) 609-642.

[13] Stoffler D., Grieve R., *"Geology Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks"*, v. 01.02.07, (2007).

[14] Hasani Z., *"Investigation of rock facies, petrography and geochemistry of Paleocene*

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]

[26] Lindsey D.A., Woodruff L.G., Cannon W.F., Cox D.P., Heran W.D., (1986).

[27] Hahn G.A., Thorson J.P., *"Geology of the Lisbon Valley Sandstone-Hosted Disseminated Copper Deposits, San Juan County"* (2005).

[28] Enayati Kolayi S., Yazdi M., Mokhtari, *"A. Mineralogy of copper in Miocene sedimentary rocks in Tash-Kand area (north of Tabriz) "*, 30th meeting of earth sciences (2011).

[29] Mahdavi A., *"Geology, Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Markashe Copper Deposits, Northwest of Raver, Kerman Province"* Master's Thesis, Economic Geology, Tarbiat Modares University, (2008) 188 p.

[DOI: 10.61186/ijcm.32.1.83]